VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG ZUGGATTUNGSSPEZIFISCHER FOLGEVERSPÄTUNGEN
- Ein Beitrag zur Erhöhung der Leistungsqualität der Eisenbahn -

Univ.-Prof. Dr.-Ing. WULF SCHWANHÄUSSER, RWTH Aachen/BRD

1. Aufgabenstellung

Die Definition von Vor- und Nachrang von Fahrwegen oder Fahrten dient im Verkehrswesen zur Verbesserung der Betriebsflüssigkeit. Allgemein wird die Summe aller Wartezeiten vor einer Bedienungsstelle minimiert, wenn die Verkehrseinheiten, beginnend mit der kleinsten Bedienungszeit, in der Reihenfolge ihrer Mindestfahrtenfolgezeiten bedient werden. Bei stark belasteten Verkehrsknoten führt dieses Verfahren bei Verkehrseinheiten mit großen Mindestzugfolgezeiten zu besonders langen Wartezeiten.

Da im Eisenbahnbetrieb wegen ihrer höheren Geschwindigkeiten die ReisezÜge im allgemeinen auch geringere Mindestzugfolgezeiten verursachen als langsame und lange GüterzÜge, führt die Beachtung der Rangordnung der ZÜge im Eisenbahnbetrieb zu einer Minimierung der Warteschlangenlängen und zu einer im Sinne der Qualität des Produktes Personenverkehr günstigen Minimierung der Wartezeiten der ReisezÜge, die umso kleiner werden, je höher die Rangordnung dieser ZÜge festgelegt wird. Dieses Prinzip schützt weitlaufende ReisezÜge, die im Verspätungsfall durch ihre Anschlußbindungen weit ausstrahlende Folgeverspätungen erzeugen können, vor Verspätungen.

Dieser Vorteil der ReisezÜge, der in Konkurrenz zum Straßenverkehr bei zunehmend verstopften Fernstraßen hoch zu bewerten ist, erzeugt für den EisenbahngÜterverkehr einen gravierenden Mangel. Die im Vergleich zum Lkw von der Fahrgeschwindigkeit her durchaus gleich schnellen GüterzÜge erleiden über die Wartezeiten aus Einfädelung hinaus erhebliche Wartezeiten infolge der Überholung durch ReisezÜge [1]. Dieser Nachteil war für MassengutzÜge nur kostenwirksam, verschlechterte die Marktposition aber nicht entscheidend. FÜr GüterzÜge, die hochwertige Handelswaren befördern oder als "LogistikzÜge" enge zeitliche Bindungen in den Produktionsprozeß erfordern, sind solche, großenteils nicht vorauskalkulierbaren Folgeverspätungen kommerziell katastrophal.

Es ist daher erforderlich, neben der Länge der Warteschlange über alle ZÜge auch die Wartevorgänge je Zuggattung bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Strecken, Bahnhöfen und Fahrstraßenknoten zu berücksichtigen, wenn man die Leistungsfähigkeit einer Betriebsanlage als die Auslastungsgrenze betrachtet, bei der das Produkt noch marktgerecht, also verkäuflich erstellt werden kann.

2. Wartezeiten im Fahrplan

Bereits bei der Konstruktion der Fahrpläne erleiden die ZÜge entsprechend der Reihenfolge ihrer Bearbeitung im Jahresfahrplan umso größere Wartezeiten, je später sie eingelegt werden. So werden internationale SchnellzÜge und ZÜge mit Taktfahrplänen, wie IC und S-BahnzÜge, kaum Wartezeiten im Fahrplan erhalten, während Übergabefahrten und Lokleerfahrten erst oft weit nach ihrer, aus der Sicht des GÜterverkehrsmarktes günstigsten Zeit eingelegt werden können.

Zur Ermittlung dieser Wartezeiten stehen zwei Gruppen von Verfahren zur VerfÜgung:

- das Verfahren der stochastischen (asynchronen) Simulation STRESI [2] [3] und das
- wahrscheinlichkeitstheoretische analytische Verfahren wie STRELE nach [4].

Außerdem werden in dem konstruktiven Verfahren FAHRPLAN [5] bereits bei der Fahrplanblattbearbeitung die erforderlichen Verschiebungen der Fahrplantrassen erfaßt und zuggattungsspezifisch ausgeworfen. Bei diesem CAD-Verfahren FAHRPLAN "Qualitätssicherung im Fahrplan" bei der Bildblattbearbeitung über den Bildschirm wird der Blattbearbeiter außerdem gewarnt, wenn die Stunden-, Vierstunden- oder Dauerleistungsfähigkeit überschritten wird.

3. Wartezeiten im Betrieb

Die Wartezeiten im Betrieb äußern sich in der Form von Folgeverspätungen. Das Verfahren STRESI erlaubt es, auch diese zuggattungsspezifisch für den Betrieb auf zweigleisigen Strecken mit Hilfe der asynchronen Simulation unter exakter Beachtung der Rangordnung zu er-

fassen. Für Ermittlungen der L e i s t u n g s f ä h i g k e i t eignen sich jedoch wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren wegen ihrer breiteren und allgemeingültigeren Erfassung der betrieblichen Wirklichkeit etwas besser. Hier sind für die zuggattungsspezifische Ermittlung der Folgeverspätungen drei Verfahren denkbar:

1. Berechnung des Erwartungswertes der Folgeverspätung über alle ZÜge [6] und proportionale Zuscheidung der Folgeverspätungen auf die Zuggattungen entsprechend den Anteilen dieser Zuggattungen an der Summe aller Wartezeiten aus Einfädelung im Fahrplan.
2. Berechnung der Erwartungswerte der Folgeverspätung und der Verspätungswahrscheinlichkeiten je Zugfolgefall.
3. Kaskadenförmige Ermittlung der Folgeverspätungen je Zuggattung durch stufenweise Erhöhung der Zugzahl um jeweils die Anzahl der ZÜge einer Zuggattung und Berechnung der Folgeverspätungen nach den Verfahren 1. Durch Differenzbildung muß sich dann die Summe der Folgeverspätungen in dieser Zuggattung ergeben.

Das erste Verfahren ist Bestandteil des kurz vor seiner Fertigstellung stehenden Softwarepaketes ALFA zur "Analytischen Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Fahrstraßenknoten auf PC". Bei dem zweiten Verfahren ist es bisher nicht gelungen, die Stauwirkungen höherer Ordnung, also aus Folgeverspätungen von Folgeverspätungen, wirklichkeitsnah zu berechnen. Das letztere Verfahren wurde als erste Aktivität im Rahmen der Kooperationsvereinbarung RWTH Aachen - HfV Dresden mit Hilfe von STRELE für einen konkreten Streckenabschnitt auf seine Machbarkeit untersucht.

4. Arbeitsweise des "Kaskadenverfahrens"

Mit Hilfe von STRELE wurde zuerst die Infrastruktur des betrachteten Streckenabschnittes aufgenommen. Dann wurden die ModellzÜge (vgl. Tafel 1) definiert.

lfd. Nr.	Zuggat.	Zugnummer	Rang	Laufweg	Zugzahl	Verspätungsniveau pm [min]	we
1	IC	40	4	K-D	4	4.17	.5625
2	D	320	8	K-D	22	8.80	.7266
3	E	3660	10	K-D(E,H)	13	4.08	.5263
4	E	6480	10	K-Ho(-Q)	3	4.08	.5263
5	Sg	43004	10	E-D	8	10.83	.4390
6	N	7868	16	K-Ho(-Q)	5	4.35	.4792
7	N	8016	16	K-D (Q)	23	4.70	.6887
8	Dg	46038	18	E-D	12	14.02	.5185
9	Gdg	47018	18	E-D	9	18.28	.2368
10	Gdg	57884	18	E-Ho(-Q)	10	18.28	.2368
11	Lz	14470	24	E-D	14	6.25	.2581
12	Lz	86900	24	E-Ho(-Q)	2	18.28	.2368

Tafel 1: Im Beispiel verwendete ModellzÜge

Für diese wurden in 5 Stufen zuerst für die IC, dann für IC und D usw., jeweils als Gesamtbelegung betrachtet, die Matrices der Mindestzugfolgezeiten, die mittleren Mindestzugfolgezeiten (vgl. Tafel 2) der gleichrangigen und der ungleichrangigen Zugfolgefälle, die mittlere Einbruchsverspätung und der gemeinsame Verspätungsgrad als gewogenes Mittel der beteiligten ZÜge ermittelt. Damit gelten für jede Stufe der Kaskade andere Parameter. Es wird also zuerst angenommen, daß der Streckenabschnitt nur von IC, dann von IC und D, dann von IC-, D- und E-ZÜgen usw. befahren würde. Für jede Stufe der Kaskade wurden daraus die Folgeverspätungen berechnet. Der Erwartungswert l_{wb} der mittleren Länge der Warteschlange aus Einfädelung im Betrieb ergibt sich für zufällig (negativ-exponential) verteilte Pufferzeiten und negativ-exponential verteilte Einbruchsverspätungen [4] aus

$$l_{wb} = (w_e - \frac{w_e^2}{2}) \left[w_g \left(1 - e^{\bar{z}_g/p_m}\right)^2 + (1 - w_g) \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \left(1 - e^{-2\bar{z}_v/p_m}\right) \frac{\bar{z}_v}{p_m} + \left(1 - e^{-\bar{z}/p_m}\right)^2 \frac{\bar{z}}{\bar{r}}\right] :$$

$$: \left[\left(\frac{\bar{z}}{p_m}\right)^2 \left(1 - \frac{\bar{r}}{\bar{z}}\right) \left(\frac{\bar{r}}{\bar{z}} + \frac{p_m \left(1 - e^{-\bar{z}/p_m}\right)}{z}\right)\right] \qquad (1)$$

Hierin bedeuten:

p_m mittlere Einbruchsverspätung der verspäteten ZÜge

w_e Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Einbruchsverspätungen

w_g Wahrscheinlichkeit für das Auftreten gleichrangiger ZÜge

$\bar{z}_g$ mittlere Mindestzugfolgezeit der gleichrangigen Zugfolgefälle

$\bar{z}_v$ mittlere Mindestzugfolgezeit der rangunterschiedlichen Zugfolgefälle

$\bar{z}$ mittlere Mindestzugfolgezeit

$\bar{r}$ mittlere Pufferzeit

Bei getakteten Fahrplänen kann hier auch die Gleichung (2) zur Ermittlung der Folgeverspätungen bei konstanten Pufferzeiten [4] und negativ-exponential verteilten Einbruchsverspätungen verwendet werden.

$$l_{wc} = \frac{(w_e - \frac{w_e^2}{2}) \left(1 - e^{-z_c/p_m}\right)^2 \left(1 + \frac{z_c}{r_c}\right)}{\frac{z_c}{p_m} \left(1 + \frac{r_c}{z_c}\right) \left(e^{r_c/p_m} - e^{z_c/p_m}\right)}$$

Hierin bedeuten:

z_c Mindestzugfolgezeit zwischen gleichen ModellzÜgen [min]

r_c konstante Pufferzeit in Taktfahrplänen [min]

p_m mittlere negativ-exponential verteilte Einbruchsverspätung der verspäteten ZÜge [min]

w_e Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Einbruchsverspätung

Diese ist allerdings noch nicht in STRELE eingearbeitet. Bei großen Pufferzeiten zwischen im Stundentakt verkehrenden IC gehen die Erwartungswerte l_{wb} auch bei Verwendung der eigentlich hierfür ungeeigneten Gleichung (1) für negativ-exponential verteilte Pufferzeiten praktisch gegen Null.

Die Summe der Folgeverspätungen ergibt sich aus dem Produkt des Erwartungswertes, der Länge der Warteschlange und der Betriebszeit T zu

$$P_F = T \cdot l_w \qquad (3)$$

Bei kleinen Belegungsgraden nähert sich die mittlere Folgeverspätung je verspätetem Zug der mittleren Mindestzugfolgezeit.

5. Berechnungsbeispiel

Zwischen den in Tafel 1 aufgeführten ModellzÜgen ergab sich die in Tafel 2 aufgeführte Matrix der Mindestzugfolgezeiten.

1. Zug		lfd. Nr. 2. Zug											
lfd. Nr.	Zug-gat.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	IC	2.5	2.2	2.4	2.3	4.1	2.5	2.5	6.0	5.7	6.9	2.5	2.5
2	D	3.8	2.8	2.7	2.5	4.4	2.8	2.8	6.3	6.0	7.2	2.8	2.8
3	E	5.4	4.9	4.3	4.3	3.7	3.7	3.9	6.2	5.9	7.1	5.4	2.8
4	E	5.1	4.5	4.0	4.0	3.0	3.7	3.9	6.0	5.8	7.1	3.0	2.8
5	Sg	7.3	6.3	4.9	4.9	3.9	3.9	3.9	7.4	7.1	8.3	5.2	5.3
6	N	10.1	9.9	8.0	8.0	7.3	4.5	7.5	9.8	9.6	6.3	11.2	11.1
7	N	7.4	7.1	5.2	5.2	5.0	3.7	4.8	9.3	8.1	7.6	13.3	9.1
8	Dg	9.4	8.4	7.9	6.4	5.4	3.0	3.3	4.6	4.5	3.7	8.3	6.7
9	Gdg	8.8	8.1	8.0	6.4	5.6	3.0	3.3	5.4	4.7	3.6	9.9	6.8
10	Gdg	8.2	7.9	8.0	7.5	7.4	5.6	7.4	7.9	7.8	5.6	9.4	9.9
11	Lz	3.5	3.5	3.4	3.5	2.6	2.0	2.2	2.5	2.5	2.6	3.3	3.8
12	Lz	3.3	3.3	3.3	3.3	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.7	3.3

Tafel 2: Matrix der im Beispiel verwendeten Mindestzugfolgezeiten

In dem betrachteten Streckenabschnitt verkehren in einer Richtung 28 NahverkehrszÜge. N3 = 50 ZÜge (IC, D, E, Sg) in der 3. Kaskade sind höherrangig und 47 (Dg, Gdg, Lz) sind nachrangig. Hier soll der Erwartungswert der Folgeverspätung und die Verspätungswahrscheinlichkeit dieser NahverkehrszÜge ermittelt werden.

Die Summe der Folgeverspätungen der höherrangigen IC, D, E und Sg ergab sich zu Pf3 = 12 min/d bei einer mittleren Mindestzugfolgezeit von 3,87 min zwischen diesen ZÜgen und betrug damit nur 12/50 = 0,24 min je Zug.

In der 4. Stufe der "Kaskade", einschließlich der NahverkehrszÜge mit einer Anzahl von N4 = 78 ZÜgen, betrug die Summe der Folgeverspätungen Pf4 = 42 min. Nun schrumpfte die mittlere Pufferzeit auf nur noch r = 13,97 min, und die mittlere Mindestzugfolgezeit wuchs geringfügig auf 4,49 min an. Die Differenz Pf4 - Pf3 = 42 - 12 = 30 min stellt damit die Summe der Folgeverspätungen der 28 Nahverkehrszüge dar. Im Mittel erhalten diese damit 30/28 = 1,07 min Folgeverspätung.

In der 5. Stufe mit Dg und Gdg steigt die Zugzahl um weitere 31 ZÜge auf N5 = 109 ZÜge/d an. Die Summe der Folgeverspätungen erhöht sich auf Pf5 = 153 min, so daß die 31 Dg und Gdg in der Summe 153 - 42 = 111 min oder im Mittel 111/31 = 3,6 min/Zug Folgeverspätung erleiden, die durch hier nicht erfaßte Wartezeiten aus Überholung noch anwächst.

In der untersten Rangordnungsgruppe, den 16 Lokleerfahrten Lz, beträgt die mittlere Folgeverspätung (203 - 153) / 16 = 2,81 min. Die gegenüber den Dg und Gdg kleineren mittleren Folgeverspätungen der Lz beruhen auf den im Vergleich zu Dg und Gdg drastisch kleineren Mindestzugfolgezeiten dieser ZÜge.

6. Folgerungen

Mit Hilfe des Softwarepaketes STRELE ist es möglich, auch zuggattungsspezifisch Folgeverspätungen zu ermitteln. Es wird sinnvoll sein, dieses standardmäßig um diesen Teil zu erweitern. Dabei sollte auch die Berechnung der Leistungsfähigkeit und der Folgeverspätungen bei Taktfahrplänen mit erfaßt werden. Es ist zweifelhaft, ob es dann noch erforderlich ist, das zweite denkbare Verfahren mit Erfassung der Folgeverspätungen je Zugfolgefall voll zu entwickeln.

Literaturhinweise

[1] Schwanhäußer, W.: "Der Erwartungswert von Zeitverlusten durch Überholungen auf Eisenbahnstrecken", AET, Folge 36, 1981

[2] Putzer, S.: "Simulationsmodell für den Eisenbahnbetrieb auf dreigleisigen Strecken", Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 33, 1981

[3] Schwanhäußer, W.: "Die asynchrone Simulation des Eisenbahnbetriebes", ETR 34 (1985), Heft 11, S. 835

[4] Schwanhäußer, W.: "Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn", Diss. RWTH Aachen 1974, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 20, Aachen 1974

[5] Brünger, O.: "Interaktive Bildfahrplan-Blattbearbeitung mit Kontrolle der Betriebsqualität", Vortrag 16. Verkehrswissenschaftliche Tage der HfV Friedrich List, Dresden, 1989

[6] Wakob, H.: "Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte Leistungsfähigkeit und Anlagenbelastung", Diss. RWTH Aachen 1984, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 36, Aachen 1985